



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

METODY POČÍTAČOVÉ VIZUALIZACE PROUDĚNÍ

COMPUTER GRAPHICS FLOW VISUALIZATION METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VERONIKA ČASTULÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ URBAN

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Veronika Častulíková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Urban**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metody počítačové vizualizace proudění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vizualizace dat je součástí závěrečné fáze numerických simulací proudění. Jde o převedení surových dat (čísel) na počítačové modely, které jsou následně renderovány – výstupem jsou obrázky nebo animace. Ty pak člověku umožňují získaným datům lépe porozumět. V oblasti proudění kapalin nám v kombinaci s prověřenými CFD metodami umožňují vidět to, co přímo z experimentů umíme zachytit pouze omezeně, nebo dokonce vůbec.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše z oblasti počítačové vizualizace dat se zaměřením na aplikace v oblasti proudění
- návrhy a vytvoření vizualizací dodaných dat (proudění v difuzoru s přítomností tzv. vírového copu) ve vhodných softwarech
- popis zachycených jevů a zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

POST, Fritz H. a Theo VAN WALSUM. Fluid flow visualization. Focus on Scientific Visualization. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993, s. 1-40. DOI: 10.1007/978-3-642-77165-1_1

MORELAND, Kenneth. The ParaView Tutorial: Version 5.2 [online]. [cit. 2018-08-29]. Dostupné z: <https://www.paraview.org/Wiki/images/1/13/ParaViewTutorial52.pdf>

PETZ, Christoph a kol. Global Modes in a Swirling Jet Undergoing Vortex Breakdown [online]. [cit. 2017-09-11]. Dostupné z: <http://berndnoack.com/publications/Petz2010aps.PDF>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Vizualizace proudění je jedním z důležitých témat ve vědecké vizualizaci, která je předmětem neutuchajícího výzkumu. Data získaná prostřednictvím numerických simulací jsou dále analyzována pro lepší pochopení proudění tekutiny. S rychlým rozvojem výpočetních simulací je spojen také nárůst poptávky po pokročilejších vizualizačních metodách.

V bakalářské práci je uveden přehled některých používaných vizualizačních technik v oblasti proudění a jejich detailní popis. Následně jsou tyto metody aplikovány na data získaná z CFD simulací vírového copu v difuzoru vírového generátoru.

Klíčová slova

vizualizace, vizualizace proudění, vektorové pole, proudnice, trajektorie, vírový cop, jádro víru

Abstract

Flow visualization is one of the important topics in the scientific visualization, which is a subject of ongoing research. Data obtained by numerical simulations are further analysed to gain a better understanding of fluid flow. With the rapid development of computational simulations, demand for more advanced visualization methods has grown.

Basic overview and a detailed description of the fluid flow visualization techniques is introduced in the bachelor thesis. Afterwards, the techniques are applied on data obtained by CFD simulation of a vortex rope in the draft tube swirl generator.

Key Words

visualization, flow visualization, vector field, streamlines, pathlines, vortex rope, vortex core

Bibliografická citace

ČASTULÍKOVÁ, Veronika. *Metody počítačové vizualizace proudění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Urban.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci s názvem Metody počítačové vizualizace proudění vypracovala samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Urbana s využitím svých znalostí a uvedených zdrojů.

V Brně dne 23.05.2019

Veronika Častulíková

Poděkování

Chtěla bych tímto poděkovat Ing. Ondřeji Urbanovi, za možnost vypracovat pod jeho vedením tuto bakalářskou práci. Zároveň bych chtěla také poděkovat za poskytnutá data, cenné připomínky, ochotu a čas, které mi poskytl v průběhu jejího vypracovávání. Velké poděkování patří také mé rodině.

Obsah

Úvod	10
1 Charakteristika proudění	11
1.1 Definice základních matematických operátorů.....	11
1.2 Lagrangeova a Eulerova metoda popisu kontinua.....	12
2 Turbulentní proudění.....	15
2.1 Charakter turbulentního proudění	15
2.1.1 Vířivost.....	15
2.1.2 Nestabilita proudění	15
2.1.3 Koherentní struktury	16
2.2 Vírový cop	16
3 Počítačová vizualizace dat.....	19
3.1 Základní pojmy	19
3.2 Algoritmy počítačové vizualizace dat.....	20
3.3 Klasifikace	21
3.4 Základní techniky tvorby vizualizací.....	22
3.4.1 Zobrazování vektorů	22
3.4.2 Techniky založené na principu sledování částic	23
3.4.3 Kontury	26
3.4.4 Objemové renderování	28
3.4.5 Animace	29
4 Prvky a veličiny k vizualizaci proudění.....	30
4.1 Proudnice a proudoplochy	30
4.2 Trajektorie částic.....	31
4.3 Emisní čára	32
4.4 Vírové čáry a vírové trubice	32
5 Softwary pro vizualizaci dat	34
5.1 ParaView.....	34
6 Metody pro identifikaci jader vírů	35
6.1 Q kritérium.....	36
6.2 λ_2 kritérium.....	37
6.3 Normalizovaná helicity	37
7 Transport pasivního skaláru	38
7.1 Lagrangeova metoda.....	38
7.2 Eulerova metoda	38
7.3 Vizualizace metodou transportu pasivního skaláru	39
Závěr	40
Seznam použitých zdrojů.....	42
Seznam symbolů a jednotek	46
Seznam použitých zkratk	47

Úvod

Grafická vizualizace, tak jak je v dnešní době chápána, se zrodila s nástupem vědeckých výpočtů a počítačové grafiky. V uplynulých desetiletích zaznamenala oblast výpočetních technologií velký růst, což nám umožňuje vnímat fyzický svět přesněji a modelovat a simulovat složité fyzikální jevy.

V oblasti dynamiky tekutin je vizualizace součástí závěrečné fáze numerických simulací. Umožňuje zobrazit chování systému ve smysluplné podobě a identifikovat a analyzovat hlavní vlastnosti a charakteristiky proudění ve formě obrázků nebo animací. S tím je spojeno zpracování velkého množství multidimenzionálních dat. Klíčovým problémem je převedení trojrozměrných dat na dvourozměrná tak, aby vypovídající hodnota byla co nejvyšší.

Cílem této práce je především podat přehled o základních technikách vykreslování proudění a následně tyto metody aplikovat na data získaná z CFD simulací vírového copu v difuzoru vírového generátoru. Struktura označovaná jako vírový cop vzniká jako důsledek nestability proudění v sací troubě turbíny a je spojena s nežádoucími jevy, kterými mohou být silné tlakové pulzace, pokles účinnosti stroje anebo vibrace stroje.

Výskyt vírového copu závisí na provozním režimu turbíny. Úvodní dvě kapitoly jsou proto věnovány základním principům dynamiky tekutin, zejména v oblasti turbulentního proudění. Následně je cílem nastínit problematiku vzniku vírového copu a aplikovat získané poznatky na jeho vizualizaci.

V kapitole 3 je nejprve uveden obecný algoritmus vizualizace. Zároveň jsou v této kapitole klasifikovány přístupy, jakými lze na data pohlížet před jejich samotným zpracováním. Poté následuje výčet jednotlivých vizualizačních technik, často používaných v oblasti proudění. Volba technik závisí na konkrétní aplikaci a řešeném problému.

Vizualizace uvedené v této práci byly provedeny v programu ParaView, který je popsán v kapitole 5 společně s některými dalšími softwary pro vizualizaci.

Pro lepší porozumění a analyzování získaných výsledků bývá vhodné extrahovat pouze ty části, které jsou pro pozorovatele středem zájmu. Způsob, jakým jsou vybraná data extrahována a co je pro nás zajímavé, závisí obdobně na konkrétním problému, aplikaci a datech. V našem případě se zaměříme na detekci vírů a vírových jader. Je nesporné, že identifikační metody a kritériální veličiny, sloužící ke stanovení vírových struktur v proudění jsou velmi potřebné a také užitečné. V odborné literatuře jsou tyto metody stále středem zájmu a v této práci jim je věnována kapitola 6.

1 Charakteristika proudění

Pohyb tekutiny obecně nazýváme prouděním. V této kapitole bude nastíněna základní myšlenka a postup při matematickém popisu proudění tekutiny.

V obecném případě je proudění tekutiny popsáno základními veličinami, kterými jsou tlak p , teplota T , hustota ρ a rychlost \vec{v} . V reálném pohledu jsou tyto parametry definovány jako vícerozměrná pole.

$$p = f(x, y, z, t)$$

$$T = f(x, y, z, t)$$

$$\rho = f(x, y, z, t)$$

$$\vec{v} = f(x, y, z, t)$$

V každém bodě tekutiny je pak nutné řešit rovnice proudění, které reprezentují tři zákony:

- Zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity
- Zákon zachování hybnosti – Navierova-Stokesova rovnice
- Zákon zachování energie – rovnice energie

1.1 Definice základních matematických operátorů

Z matematického pohledu jde při proudění o řešení soustavy diferenciálních rovnic, proto je nejdříve vhodné definovat několik základních operátorů, které se v nich často vyskytují.

Gradient

Gradient je diferenciální operátor, použitelný na skalární pole $f(\vec{r})$, kde $\vec{r} = (x, y, z)$ značí polohový vektor bodu. Výsledkem je pole vektorové, jehož složkami jsou parciální derivace skalárního pole podle jednotlivých souřadnic. Určuje směr nejvyššího spádu funkce f .

Gradient, stejně jako další diferenciální operátory, lze vyjádřit pomocí Hamiltonova operátoru nabla ∇ , který je definovaný jako vektor, jehož složkami jsou symboly parciálních derivací dle jednotlivých proměnných.^[2]

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (1.1)$$

Gradient pak lze zapsat následovně.

$$\text{grad } f \equiv \nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (1.2)$$

Divergence

Divergence, na rozdíl od gradientu, převádí vektorovou funkci na skalární. Divergenci vektorového pole $\vec{F}(\vec{r})$ lze pomocí operátoru nabla vyjádřit jako skalární součin operátoru s tímto polem.

$$\operatorname{div} \vec{F} \equiv \nabla \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (1.3)$$

Jako výsledek divergence dostáváme tedy pole skalární, které je součtem parciálních derivací, kde první člen je derivací první složky vektorového pole podle první proměnné, druhý člen je derivací druhé složky podle druhé proměnné a třetí člen je derivací třetí složky podle třetí proměnné. ^[2]

Rotace

Rotaci vektorového pole můžeme vyjádřit jako vektorový součin operátoru nabla s tímto polem. ^[2]

$$\operatorname{rot} \vec{F} \equiv \nabla \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z}, \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x}, \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \quad (1.4)$$

1.2 Lagrangeova a Eulerova metoda popisu kontinua

Pro vyšetřování pohybu kapalin se zavádí představa spojitého prostředí – kontinua. Za předpokladu, že je tekutina považována za kontinuum, lze pohyb tekutiny studovat dvojím způsobem. ^[3]

První přístup, který se nazývá Lagrangeova metoda, vyšetřuje pohyb tekutiny z hlediska individuálních částic, zatímco druhým přístupem, Eulerovou metodou, je zkoumáno pole kinematických veličin. Obě tyto metody jsou podrobněji popsány níže a jejich definice je využito v kapitole 7.

Lagrangeova metoda popisu kontinua

V případě Lagrangeova přístupu si zvolíme z objemu tekutiny libovolnou elementární částici a sledujeme její pohyb. Zvolíme si tedy v počátečním čase t_0 částici určenou polohovým vektorem r_0 . Polohu částice pak lze popsat rovnicí

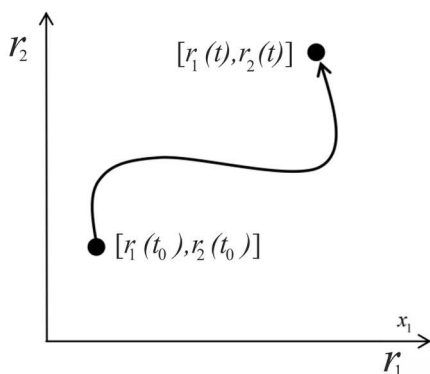
$$\vec{r} = \vec{r}(r_0, t) \quad (1.5)$$

Rychlost \vec{v} a zrychlení \vec{a} se vyjádří derivací polohy podle času:

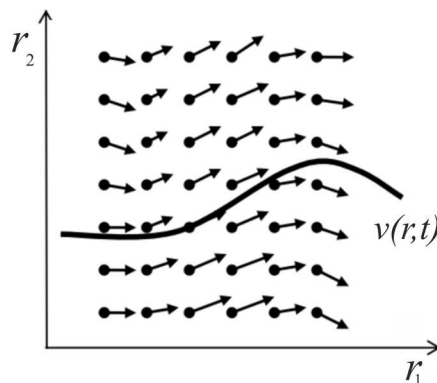
$$\vec{v} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

Lagrangeovy metody lze využít v různých speciálních úlohách, jako je zkoumání rozptylu skalární veličiny, která je vázaná na částice tekutiny.



Obr. 1.2: Lagrangeova metoda, [3] (upraveno)



Obr. 1.1: Eulerova metoda, [3] (upraveno)

Eulerova metoda popisu kontinua

Eulerova metoda sleduje stav proudění tekutiny v daném bodě oblasti. Kinematický stav tekutiny ve zkoumaném bodě charakterizujeme vektorem rychlosti $\vec{v}(\vec{r}, t)$.

Zrychlení částice \vec{a} , která v daném okamžiku zaujímá zkoumaný bod v prostoru, se získá vyjádřením substanciální (materiálové) derivace, což je speciální případ totální derivace „sledující pohyb částice“, značená jako $\frac{D}{Dt}$. Substanciální derivaci je možné vyjádřit pomocí parciálních Eulerových derivací z Taylorova rozvoje.^{[3][6]}

Pomocí Taylorova rozvoje pak lze vyjádřit rychlost ve zvoleném vztažném místě \vec{r} navýšenou o elementární přírůstek $d\vec{r}$ a v čase t navýšenou o dt . Potom pro i -tou složku vektoru rychlosti $\vec{v}_i + d\vec{v}_i$ v čase $t + dt$ lze psát:

$$\begin{aligned} \vec{v}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, t) + d\vec{v} &= \vec{v}_i(\vec{r}_1 + d\vec{r}_1, \vec{r}_2 + d\vec{r}_2, \vec{r}_3 + d\vec{r}_3, t + dt) \\ &\doteq \vec{v}_i(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, t) + \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{r}_1} d\vec{r}_1 + \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{r}_2} d\vec{r}_2 + \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{r}_3} d\vec{r}_3 + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} dt \end{aligned} \quad (1.8)$$

Ve třídimenčním případě jsou parciální derivace rychlosti podle jednotlivých proměnných násobeny totálním diferenciálem příslušné proměnné.

Použitím Hamiltonova operátoru nabla má pak rovnice tvar:

$$\vec{v}(\vec{r}, t) + d\vec{v} = \vec{v}(\vec{r} + d\vec{r}, t + dt) \doteq \vec{v}(\vec{r}, t) + (\vec{v} \cdot \nabla) d\vec{r} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} dt \quad (1.9)$$

Převedením $\vec{v}(\vec{r}, t)$ na levou stranu dostaneme:

$$\vec{v}(\vec{r} + d\vec{r}, t + dt) - \vec{v}(\vec{r}, t) = (\vec{v} \cdot \nabla) d\vec{r} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} dt \quad (1.10)$$

kde rozdíl $\vec{v}(\vec{r} + d\vec{r}, t + dt) - \vec{v}(\vec{r}, t)$ je totální diferenciál rychlosti značený $d\vec{v}$.

Jestliže se pak rovnice (1.10) vydělí dt , získáme totální derivaci rychlosti podle času.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = (\vec{v} \cdot \nabla) \frac{d\vec{r}}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (1.11)$$

Jestliže v rámci Lagrangeova popisu sledujeme částici, musí být $\frac{d\vec{r}}{dt}$ zvolena tak, že odpovídá rychlosti částice \vec{v} . Člen $\frac{d\vec{v}}{dt}$ pro tento případ značíme jako $\frac{D\vec{v}}{Dt}$, což je substanciální (materiálová) derivace. Zrychlení lze zapsat ve tvaru:

$$\vec{a} = \frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \quad (1.12)$$

2 Turbulentní proudění

2.1 Charakter turbulentního proudění

Charakter turbulentního proudění lze vyjádřit výčtem vlastností a atributů. Tyto vlastnosti, jako je náhodnost, difuzita, disipativita a další, jsou detailněji popsány v literatuře ^[3]. My se omezíme pouze na jeden ze základních atributů turbulentního proudění, a tím je jeho vířivá povaha.

2.1.1 Vířivost

Vířivý pohyb je charakterizován rotací částice tekutiny kolem vlastní osy. Matematicky lze popsat vířivý pohyb vektorem víru rychlosti $\vec{\omega}$ (jinak také nazývaného jako vířivost). Pomocí vektorového zápisu je vyjádřen jako^[7]:

$$\vec{\omega} = \text{rot} \vec{v} \quad (2.1)$$

Pokud je jeho hodnota nulová ($\vec{\omega} = 0$), jedná se o proudění potenciální (nevířivé). V případě, kdy je jeho hodnota různá od nuly, proudění se nazývá vířivé a částice rotují kolem své osy. Pomocí vektoru víru rychlosti lze definovat tzv. vírovou čaru (viz kapitola 4.4).

Z hlediska uplatnění v technické praxi se využívá vířivého proudění při promíchávání směsí nebo na jeho principu pracují některá zařízení, jako je například vírová turbína nebo vířivé čerpadlo.^[8]

2.1.2 Nestabilita proudění

Nestabilita proudění je mechanismus, kterým se tekutina vyrovnává s působením vnějších sil. Jedná se především o sílu setrvačnou, gravitační, elektromagnetickou a další.^[9]

Stabilitou proudění a podmínkami, za kterých se laminární proudění stává nestabilním a přechází na proudění turbulentní, se zabýval roku 1883 anglický fyzik Osborne Reynolds.

Reynoldsův experiment

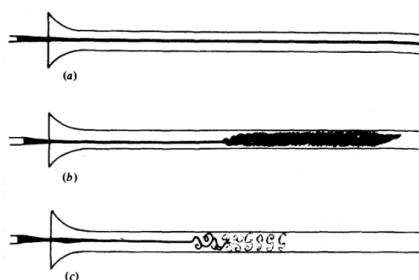
Reynoldsův experiment (obr. 2.1) spočíval ve výtoku vody z nádrže do skleněných trubic, kde proudění bylo zvýrazněno pomocí unášeného barviva, nasávaného z násosky. Regulací průtoku, a tím i rychlosti, koncovými ventily lze sledovat, že pokud je rychlost proudění dostatečně nízká, unášené barvivo vytváří téměř dokonalou přímou čáru uvnitř potrubí. S rostoucí rychlostí se vrstvy začnou promíchávat.^[3]

Kvantitativně lze podmínky, při kterých dochází k nestabilitě laminárního proudění, vyjádřit pomocí Reynoldsova čísla, které je definováno jako:

$$Re = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{viskózní síly}} = \frac{vD}{\nu} \quad (2.2)$$

kde v je charakteristická rychlost, D charakterický rozměr, ν kinematická viskozita.

Přechod z laminárního na turbulentní proudění je tedy důsledek nestability proudění, která je v tomto případě vyvolána především působením setrvačné síly. Při dosažení určité velikosti Reynoldsova čísla, bude laminární proudění nestabilní a dojde k přechodu na proudění turbulentní.



Obr. 2.1: Reynoldsův experiment [3]

2.1.3 Koherentní struktury

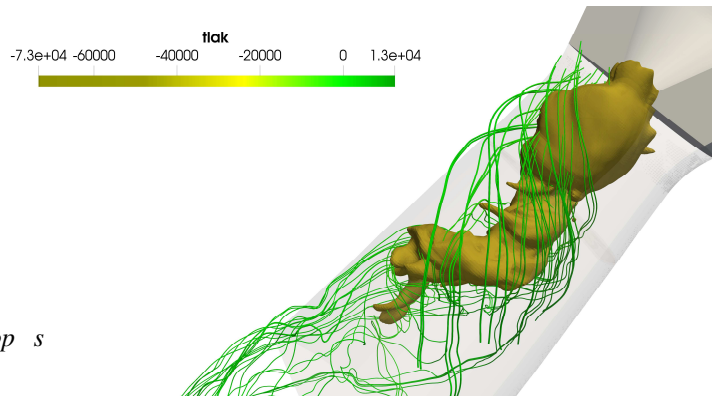
Projevem turbulentního proudění jsou jednak turbulentní víry (angl. *eddies*), což jsou malé, velmi nahodilé vírové struktury s poměrně krátkou dobou trvání, a pak koherentní struktury.

Koherentní struktury mají oproti těmto malým vírům poměrně dlouhou dobu trvání, stálý tvar a vykazují jistou pravidelnost. Lze je definovat jako malé oblasti proudění s koncentrovanou vířivostí. Příkladem koherentní struktury je Kármánova vírová stezka nebo vírový cop. ^{[4][10]}

2.2 Vírový cop

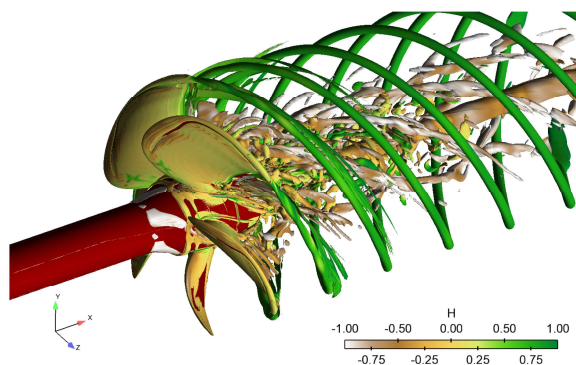
Vírový cop je pozorován převážně u turbín, které nemají možnost natáčení lopatek. Jedná se především o Francisovy turbíny, případně o axiální turbíny propelerové. Tento jev nastává tehdy, pracuje-li turbína při mimooptimálních provozních podmínkách, tj. při jiných hodnotách průtoku, než pro jaké je navržena. Vírový cop má negativní vliv na provoz zařízení, zejména když je za těchto podmínek turbína provozována delší dobu. Příkladem, kdy se dané zařízení může dostat do mimooptimálního pásma provozu, mohou být přečerpávací elektrárny, regulující množství vyrobené energie, například ze solárních panelů nebo větrných elektráren. Pokud je vyrobené energie přebytek, elektrárna je provozována při nižších průtocích, popř. vůbec. Právě z tohoto důvodu pak dochází ke vzniku vírového copu.

Vírový cop je způsoben rotací kapaliny na výstupu z oběžného kola, kde je nezpracovaný moment hybnosti. Tato struktura je velmi nestabilní. Vlivem její dynamiky dochází k výrazným tlakovým pulzacím.



Obr. 2.2: Kontura vizualizující vírový cop s hodnoty tlaku.

U propelerových turbín vzniká kromě vírového copu ještě vír na konci lopatek, kde z tlačné strany lopatky přetéká kapalina na sací stranu a vznikají spirální víry na vnějších hranicích lopatek. Takovéto vířivé struktury jsou zachyceny na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Vířivé struktury proudění na hranicích lopatek vizualizované pomocí Q -kritéria. Izopovrch Q -kritéria je zbarven helicitou. [5]

Sací trouba, ve které vírový cop vzniká, je nedílnou součástí přetlakových turbín. Základním úkolem sací trouby je redukovat kinetickou energii proudu, opouštějícího turbínu. Je schopna zužít jen meridiální složku rychlosti, což je rychlost ležící v rovině řezu podél střední čáry sací trouby.

Byl zkoumán i jev zvaný vírové kroužky. K jejich tvorbě dochází, když je vírový cop velmi nestálý. Odtržený vírový kroužek může následně narazit do stěny savky a způsobit zde výrazný výkyv tlaku, čili dochází ke značnému namáhání.^[5] V této práci jsou řešeny vizualizace výsledků výpočtového modelování vírového copu ve vírovém generátoru navrženém na Oboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana. Tento jev se zde sice podařilo zachytit experimentálně, ale bohužel ne ve výpočetní simulaci. Důvodem může být kavitace, která je s vírovým copem

spojena. Kavitace nastává v případě, když tlak v jádru víru poklesne pod hodnotu tlaku nasycených par. Zatímco u experimentu k ní docházelo, ve výpočtech nebyla brána v potaz.

Kromě vírového kroužku je další zajímavou vlastností vírového copu, pozorovanou při určitých podmínkách, tvořící se dvojitá spirála. ^{[28][10]} Tento jev je zachycen na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Tvorba dvojité spirály vírového copu.

3 Počítačová vizualizace dat

Grafická vizualizace tvoří závěrečnou část počítačových simulací a je zaměřena na vytváření obrazů, případně animací, které sdělují informace o podkladových datech.

V uplynulých desetiletích zaznamenala oblast výpočetních technologií velký růst, což nám umožňuje vnímat fyzický svět přesněji a modelovat a simulovat složité fyzikální jevy. Pro návrh objektu, auta, letadla, přístavu či součástí, která je funkčně spojena s prouděním tekutiny, může být výpočet a vizualizace jejího chování výkonným nástrojem pro vyhodnocení a optimalizaci návrhu.^{[12][14][15]}

Cíle vizualizace v oblasti dynamiky tekutin lze tedy stanovit následovně:

- zobrazení chování systému ve smysluplné podobě
- identifikace a analyzování hlavních vlastností a charakteristik proudění
- zpracování velkého množství multidimenzionálních dat

3.1 Základní pojmy

Widget je virtuální interaktivní prvek. Slouží k otevření a ovládání různých programů a programovacích skupin.^[15]

GPU (*Graphical Processing Unit*) je grafický procesor zajišťující rychlé grafické výpočty, jejichž výsledkem je obraz zobrazovaný na monitor.^[15]

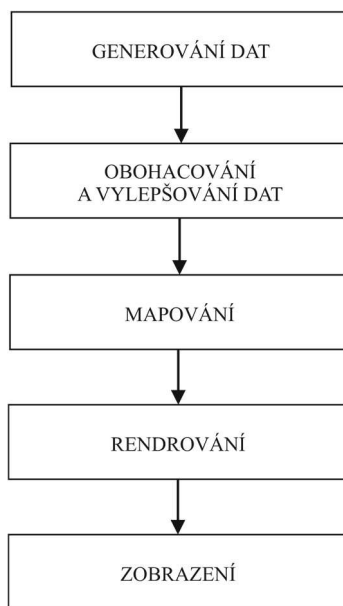
GUI (*Graphical User Interface*) je grafické uživatelské rozhraní, které slouží k interaktivnímu ovládání počítačového programu.^[15]

VTK (*Visualization Toolkit*), volně přeloženo jako vizualizační sada nástrojů, je volně dostupný softwarový systém s otevřeným zdrojovým kódem pro 3D vizualizaci. Podporuje širokou škálu vizualizačních algoritmů pro 2D a 3D skalární, vektorová, tenzorová a objemová data. Přijímá podporu a je vyvíjena společností Kitware, Inc., podobně jako program ParaView (viz kapitola 5.1).

Jednou z funkcí VTK je schopnost paralelního výpočtu a rozdělení datového souboru na menší části, které pak mohou být postupně zpracovávány.^{[15][17]}

3.2 Algoritmy počítačové vizualizace dat

Vizualizaci můžeme vidět jako sérii transformací, které převádí získaná surová data, jako jsou data získaná ze simulací, do zobrazitelného výstupu – obrazu. Cíl těchto transformací je tedy převést informace do takového formátu, kterému můžeme porozumět, a který zároveň zachová integritu informací. Obecně lze proces vizualizace rozdělit do tří hlavních fází.^[13] Pro lepší představu ale budeme vycházet z rozšířeného modelu uvedeného v literatuře^[12].



Obr. 3.1: Model pipeline vizualizačního procesu

Model pipeline, uveden na obr. 3.1 znázorňuje jednotlivé fáze vizualizačního procesu. Pipeline je základem každého 3D grafického čipu. Na začátku je vstup dat, která jsou na konci v dané formě posílána na monitor.^[15]

- **Generování dat**

První fází procesu je generování dat, získaných pomocí měření nebo numerických simulací. Tato práce se bude zabývat především daty generovanými CFD simulacemi.

- **Obohacení a vylepšení dat**

Po vygenerování následuje obohacení a vylepšení dat. Tím se myslí změna nebo výběr dat, snížení množství dat nebo zlepšení informačního obsahu. Pracuje na nezpracovaných datech získaných ze simulací a modifikuje je, jelikož „surová data“ vyplývající z procesu generování dat nejsou často vhodná pro přímou vizualizaci v dané podobě. Příkladem může být transformace domén, interpolace, vyhlazování nebo filtrování.

Numerické simulace poskytují hodnoty dat pouze na určitých diskrétních místech v rámci řešení kontinua. Proto obvykle používáme nějakou formu interpolace. Operátory

filtrování nebo vyhlazování pak použijeme v případě, kdy v nezpracovaných datech vznikly různé formy šumu.

- **Vizualizační mapování**

Další operací, spadající do přípravy dat, je vizualizační mapování. Mapování vizualizace znamená převedení dat do vhodné formy pro vizualizaci. U vizualizace proudění je to například výpočet drah částic z pole rychlosti.

- **Renderování**

Závěrečnou částí je renderování. Pojem „renderování“ lze obecně definovat jako převedení výsledků do 2D obrazu, který se zobrazí na monitoru.

3.3 Klasifikace

Vizualizace jako samostatná oblast výzkumu a vývoje vytváří most mezi daty a uživatelem. Pomáhá uživateli řešená data prozkoumat, analyzovat a následně vyhodnocovat.

V důsledku toho, že je spektrum řešení vizualizací velmi bohaté a zahrnuje mnoho dimenzí a aspektů, není snadné ani intuitivní tuto širokou problematiku rozdělit.

Jednou z možností je klasifikace podle typu atributových dat, se kterými pracují různé vizualizační algoritmy. Typem atributových dat se rozumí například skaláry, vektory nebo tenzory.

- **Skalární algoritmy** pracují na skalárních datech. Do této kategorie patří například generování vrstev teploty na mapě počasí.
- **Vektorové algoritmy** pak pracují s vektorovými daty. Typicky orientace vektorů proudění vzduchu.
- **Tenzorové algoritmy** se používají k popisu složek napětí a deformace.
- **Modelovací algoritmy.** Jedná se v podstatě o kombinaci skalárního a vektorového algoritmu. Příkladem je generování glyfů orientovaných podle směru vektoru a následně zvětšených podle skalární hodnoty.^[15]

Další možností je klasifikace dle metody vizualizace v závislosti na řešeném problému. Na základě této skutečnosti se metody vizualizace dělí do čtyř hlavních kategorií^[18]:

- **Přímé techniky vizualizace proudění**

Data jsou přímo vizualizována, bez jakéhokoli předchozího zpracování. Ve 2D případě to může být vykreslení plochy obarvené podle hodnoty skalární veličiny, se znázorněním vektorové veličiny pomocí šipek.

- **Vizualizace proudění založená na texturách**

Techniky založené na texturách používají směrovou strukturu pole proudění. Používají se především pro vizualizaci proudění ve 2D nebo na plochách. V podobě experimentu

by se daly výsledky porovnat s povrchovým prouděním oleje ve větru na povrchu zkoumaného objektu.

- **Geometrická vizualizace proudění:**

Geometrické objekty jsou nejprve extrahovány z dat a použity pro vizualizace. Příkladem tzv. geometrických vizualizací jsou proudnice a proudoplochy. Experimentem, který by mohl sloužit pro srovnání získaných výsledků, je například vstřikování barvy nebo kouře do proudu.

- **Vizualizace založená na vlastnostech proudění:**

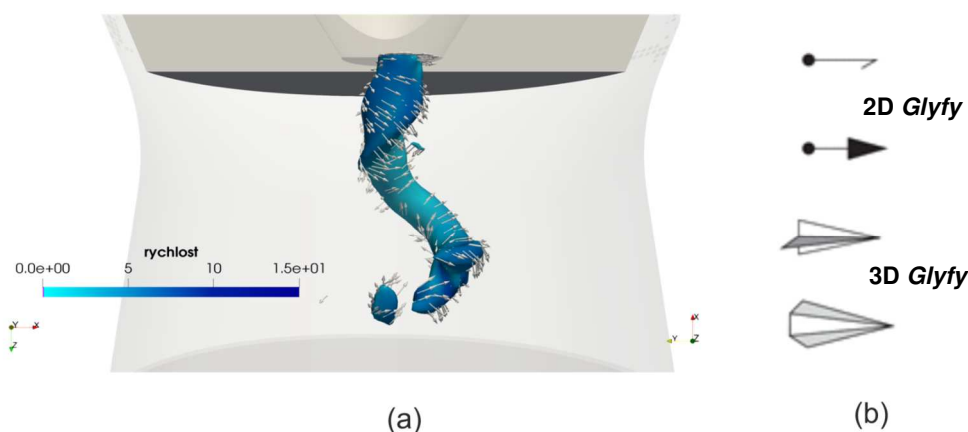
Do této skupiny spadají vizualizace, u kterých se z datových sad extrahují pouze ty části, které jsou pro pozorovatele středem zájmu. Způsob, jakým jsou vybraná data extrahována a co je pro nás zajímavé, závisí na konkrétním problému, aplikaci a datech. Mnoho algoritmů je zaměřeno například na detekci virů a vírových jader.^[15]

3.4 Základní techniky tvorby vizualizací

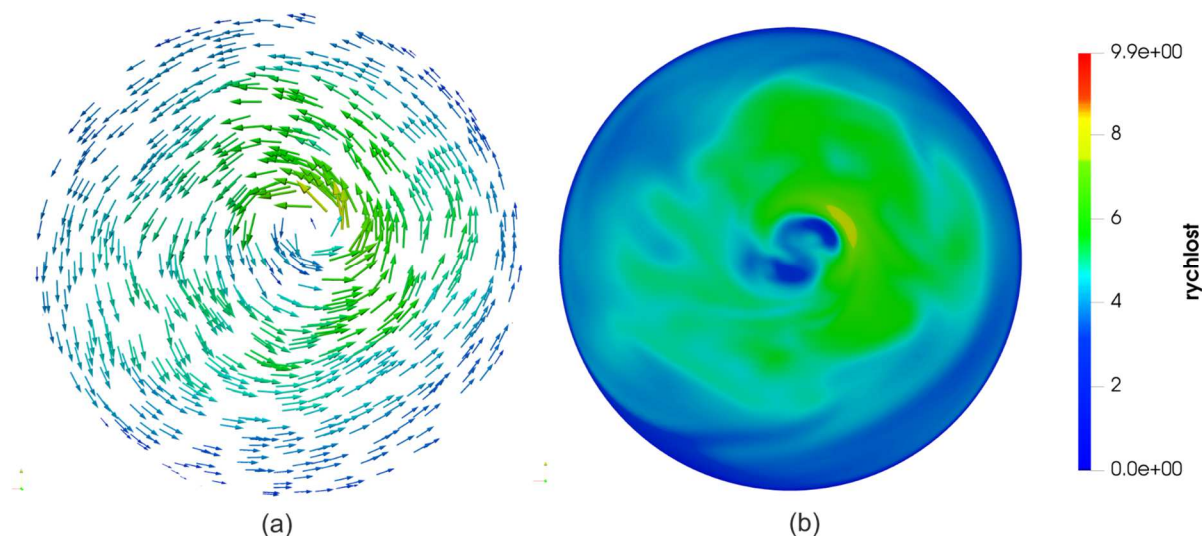
3.4.1 Zobrazování vektorů

Přirozeným zobrazením vektorové proměnné jsou šipky (angl. *arrows*), vykreslovány v jednotlivých diskretních bodech sítě.

Ve 3D se vykreslují šipky jako polygonální objekty neboli glyfy (angl. *glyphs*) – viz obr. 3.2. Kromě klasického tvaru šipek mohou mít například tvar kužele, válce, koule nebo prostých čar. Při jejich znázornění je potřeba vzít v úvahu polohu, velikost, orientaci šipky a určit rozsah tak, aby pak výsledný obraz nebyl přeplněný. Osvětlení a stíny pak slouží k lepšímu prostorovému vjemu.



Obr. 3.2: Zobrazení 3D glyfů okolo vírového copu zbarveného podle velikosti rychlosti (a), přehled vektorových vizualizačních technik (b) [15] (upraveno).

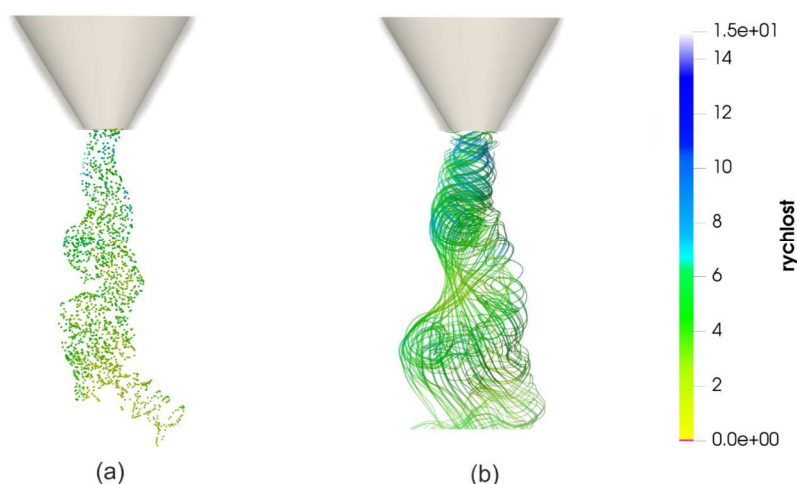


Obr. 3.3: Řez těsně pod nábojem vírového genertoru. Zobrazení šipek škálovaných v závislosti na velikosti rychlosti (a), zobrazení textury v daném řezu (b).

3.4.2 Techniky založené na principu sledování částic

Další třída vizualizačních technik je založená na charakteristických liniích získaných sledováním částic. Mezi ně patří zmíněné proudnice (angl. *streamlines*), trajektorie (angl. *pathlines*) nebo emisní čáry (angl. *streaklines*)^[26], kterými se podobněji zabývá kapitola 4.

Při zobrazování lze měnit jednotlivé atributy jako barvu, průhlednost apod. Je například vhodné snižovat jas proudnice se zvětšující se vzdáleností od pozorovatele.

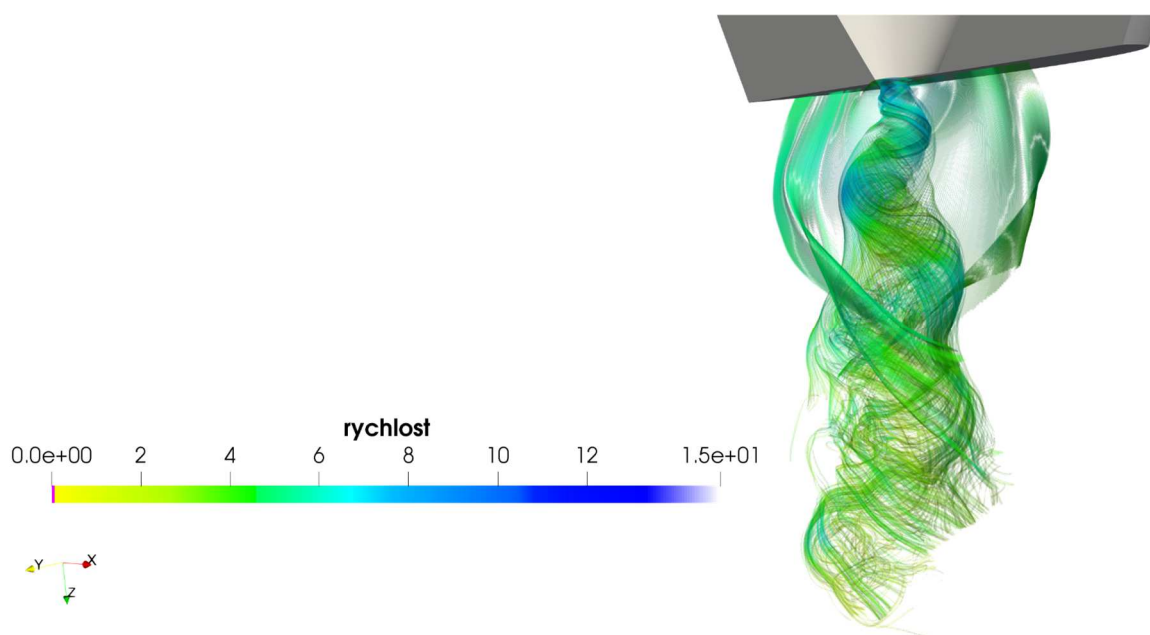


Obr. 3.4: zobrazení proudění prostřednictvím částic (a), pomocí proudnic (b), spouštěných středem náboje tak, aby bylo dobře patrné jak obíhají kolem vírového copu. I bez přidané kontury vírového copu je patrný tvar spirály.

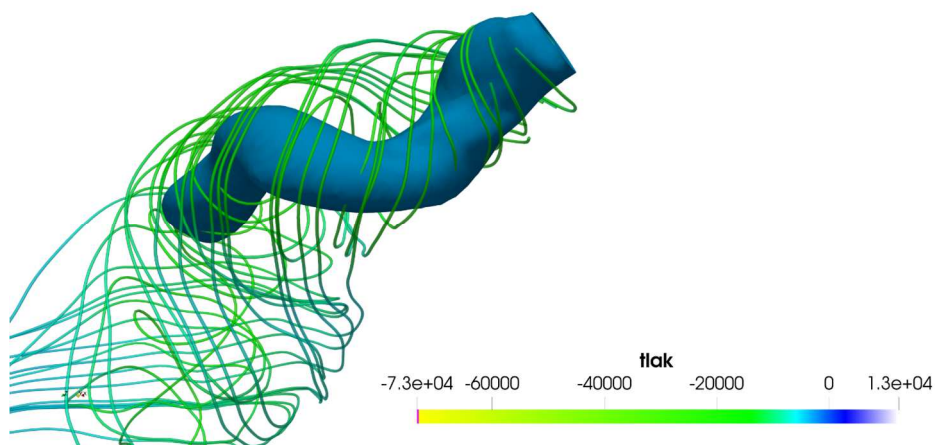
Do této kategorie spadají také „časové čáry“ (angl. *time lines*) vytvořené spojnici částic uvolněných ve stejném časovém okamžiku z různých bodů podél křivky.

Částice sledované ve velmi krátkém čase mohou být generovány jako krátké trajektorie (tzv. *streamlets*). Je možné je použít ve 2D, ve 2D-hyperplochách nebo ve 3D. Příkladem 2D hyperplochy mohou být typicky řezy přes objem.

Ve 3D umožňuje prostorová dimenze, pro stopy částic reprezentované čarami, zobrazit více informací pomocí dalších geometrických objektů. Příkladem takového rozšíření jsou „proudové trubice“ (angl. *streamtube*) nebo tzv. *streamribbon*.^{[20][19]}



Obr. 3.5: Použití *streamribbon* pro vírový cop. Při dostatečně hustém počtu lze díky nim dobře pozorovat tvar vzniklé struktury.

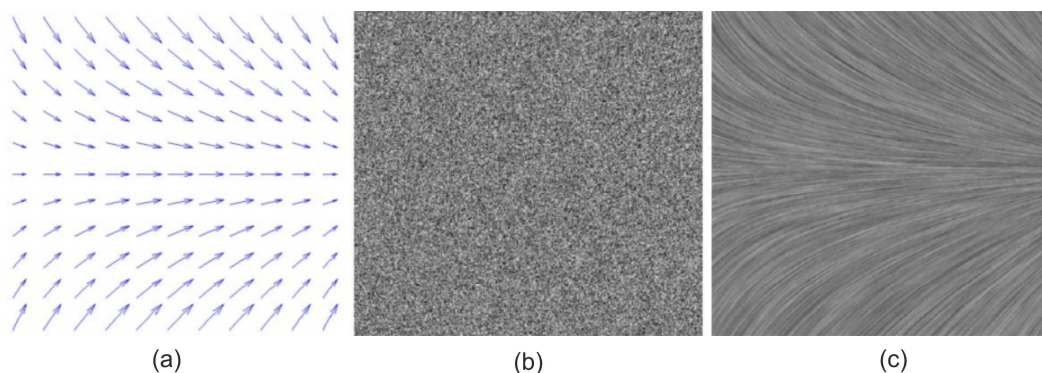


Obr. 3.6: Použití funkce *streamtube* v ParaView pro vírový cop. Důsledkem volby většího vstupního poloměru neodchází k přesnému kopírování tvaru spirály.

Základním problémem všech technik založených na částicích je volba okrajových podmínek. Je důležité vědět, odkud začít trasovat.

Vzhledem k tomu, že všechny metody sledování částic jsou založeny na řešení diferenciálních rovnic, je třeba se zabývat otázkami numerické přesnosti a rychlosti. V mnoha aplikacích se používají metody Runge–Kutta. Popřípadě, pokud je kladen požadavek na rychlost simulace, je možné použít i Eulerovy metody. Je ale nutné brát v úvahu možné zatížení výsledku velkou chybou.^{[14] [19]}

Další široce používanou metodou zobrazování vektorového pole je Lineární Integrovaná Konvoluce – LIC (angl. *line integral convolution*). LIC bere jako vstupní veličiny vektorové pole a texturu bílého šumu. Textura šumu je lokálně vyhlazena podél proudnic konvolucí. Kontrast a kvalita LIC obrazů může být zlepšena dalšími post-procesními technikami, jako je například vyrovnaní histogramu.^[19]



Obr. 3.7: Princip LIC (Line Integral Convolution), jako první zobrazení vektorového pole (a), dále bílého šumu (b), a nakonec LIC (c) [19]

Matematická formulace LIC:^[19]

$$I(x) = \int_{s_0-L}^{s_0+L} k(s-s_0) \cdot K(r(s)) dt \quad (3.1)$$

$I(x)$ – výstupní intenzita pixelu x

$K(x)$ – intenzita šumu na pozici x

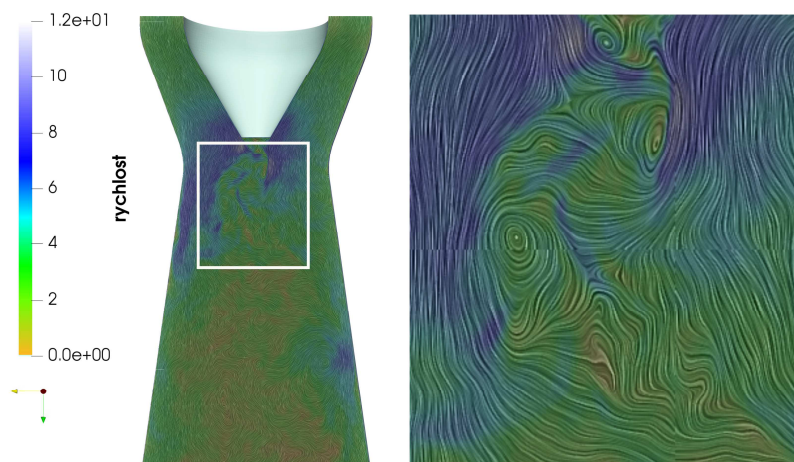
$r(s)$ – je parametrická rovnice proudnice $t \in \langle s_0 - L; s_0 + L \rangle$

$k(s)$ – kernel filtru

s – parametr křivky

L – parametr určující délku proudnice

Jak bodový šum, tak LIC jsou založeny na tzv. hustých texturních reprezentacích. Původní technika LIC neukazuje orientaci a velikost rychlostního pole, což je problém, který řeší různé varianty LIC.

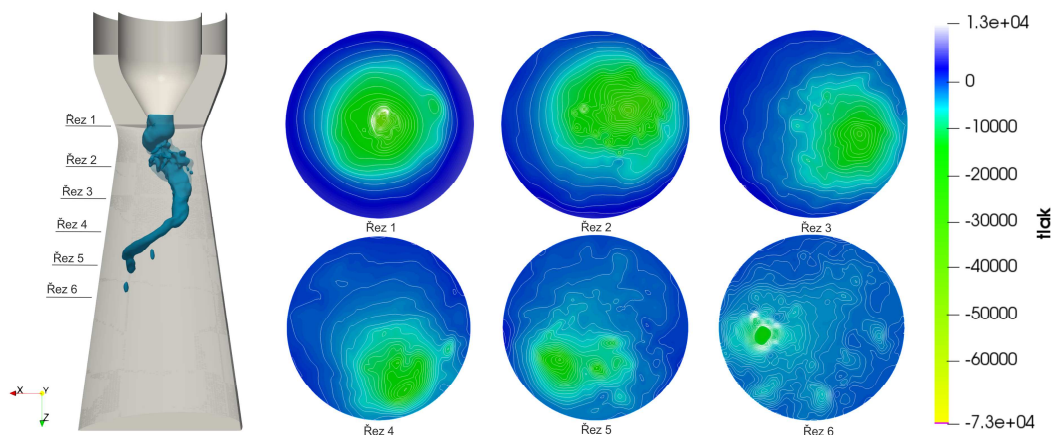


Obr. 3.8: příklad metody LIC (Line Integral Convolution) v řezu difuzorem, zbarvené podle velikosti rychlosti, vpravo přiblížení vybrané oblasti, kde jsou dobře patrná vzniklá zavíření od vírového copu a oblast, kde prošel zvolený řez jádrem copu

Kromě LIC do kategorie husté reprezentace vektorového pole lze dále zařadit metodu LEA (angl. *Lagrangian-Eulerian advection*). S touto technikou zobrazuje každý statický snímek okamžitou strukturu toku, zatímco animovaný sled snímků odhaluje pohyb, kterým by se hustá sbírka částic měla pohybovat. Tato metoda je vhodná pro zobrazení nestacionárního proudění.^[14]

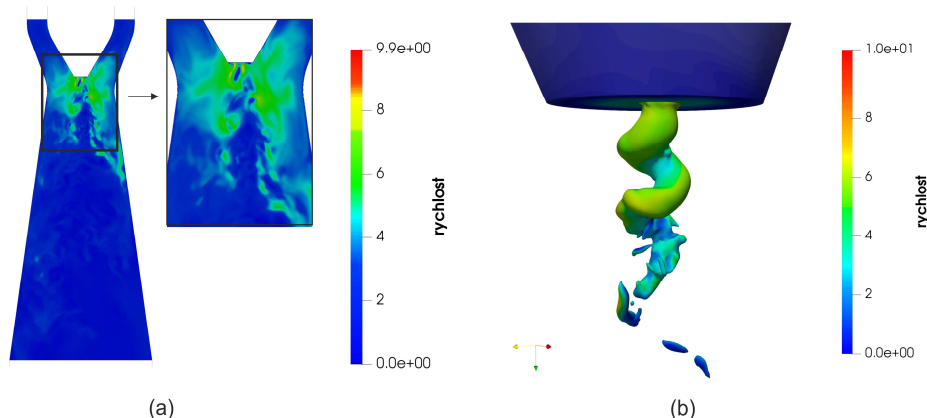
3.4.3 Kontury

Algoritmy pro extrakci konturových objektů byly původně vyvinuty pro objemová data, především pro lékařské aplikace. Kontury (angl. *contours*) jsou křivky (ve 2D) nebo plochy (ve 3D), kde skalární proměnná má konstantní hodnotu. Dle dimenze jsou nazývány buďto izokřivky nebo izoplochy.^[12]

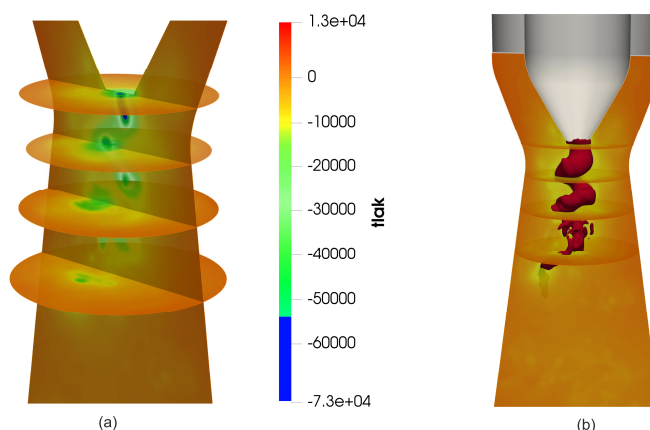


Obr.3.9: Zobrazení 2D kontur v řezech jednotlivými místy difuzoru s plně vyvinutým vírovým copem. Jeho struktura je v levé části obrázku vykreslena pomocí 3D kontury.

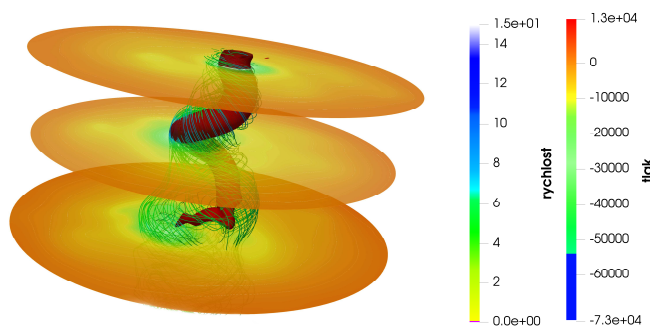
Zobrazování izoploch je metoda objemového renderování spadající do algoritmů zobrazujících povrch (viz kapitola 3.4.4). Úkolem je vyjádřit z objemu hledanou izoplochu odpovídající stanovené hodnotě. Například vykreslení plochy dle zadané hodnoty hustoty objemu nebo vzdálenosti od okraje. Stěžejní úlohou je vyhledávání všech buněk, kterými izoplocha prochází.



Obr. 3.10: Rozložení rychlosti v řezu sací trouby (a). Při detailnějším zobrazení bychom mohli sledovat vznikající zavíření na výstupu. Kontura vírového copu se škálováním rovněž podle velikosti rychlosti. (b)



Obr. 3.11: Okamžité rozložení tlaku v daných řezech (a), dává dobrou prostorovou představu o tvaru vírového copu pro daný okamžik. Kontura copu zapadající do jednotlivých řezů (b). Zároveň pro případ (a) je možné sledovat oblast nízkého tlaku pod nábojem, kde cop vzniká.



Obr. 3.12: Rozložení tlaku v daných řezech. Obdoba obr. 3.11. Jako další rozměr jsou zde doplněny proudnice.

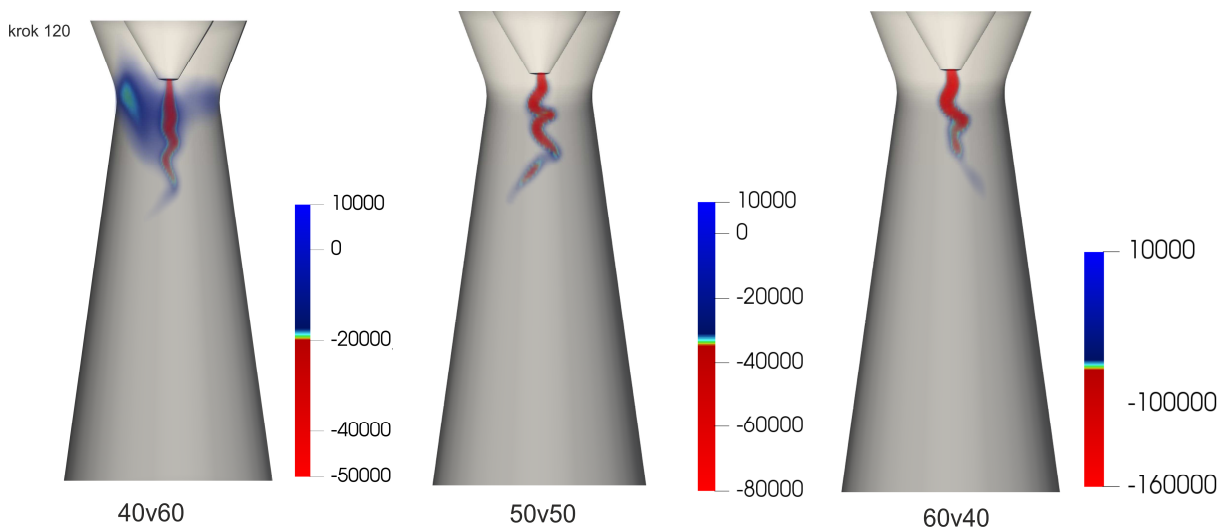
3.4.4 Objemové renderování

Proudové pole lze charakterizovat odvozením určitých skalárních veličin, které pak lze vykreslovat pomocí technik objemového renderování. Příkladem je velikost rychlosti, vířivosti nebo helicity. Také lze počítat koncentraci částic na objemovou jednotku a zobrazit skalární koncentrační pole.^[12] To je příklad transportu pasivního skaláru pro imitaci vstřikování barviva, kterému je věnována kapitola 7.

Objemové renderování (v literatuře se lze setkat také s pojmenováním volumetrické renderování) vícerozměrných dat je výpočetně velmi náročný proces. Při výpočtu používá celou trojrozměrnou síť, a tudíž je poměrně náročné na velikost paměti a výkon procesoru počítače, jelikož každé renderování výsledného obrazu vyžaduje průchod celým objemem dat.

Údaje, se kterými zde pracujeme, můžeme chápat jako sérii řezů. Každý řez je dvourozměrným polem čísel, které reprezentují určitou hodnotu (např. intenzitu). Celá série pak představuje trojrozměrné pole elementárních objemových jednotek nazývaných voxely. Voxel je analogie dvourozměrného pixelu. Jedná se o objemový element. Voxely jsou následně promítány na obrazovku a vykresleny pomocí technik objemového renderování.

Jednoduše lze definovat renderování za způsob, jakým z dat uchovaných v počítači vzniká obraz nebo sekvence obrazů.^[21]



Obr. 3.13: Zobrazení vírového copu pomocí technik objemového renderování pro tři režimy proudění. hodnoty průtoků ve spodní části jsou značeny: axiální větev -v- radiální větev

Vizualizace metodou objemového renderování, zobrazena na obr.3.13, ukazuje sktrukturu vírového copu pro tři režimy proudění. Škálování je zvoleno s ostrým přechodem tak, aby byl vírový cop dobře odlišitelný od zbytku domény. Pro hodnoty průtoků 40v60 se zvolením světle zeleného přechodu dosáhlo vykreslení víru v pravé části

Vlivem zvětšující se tangenciální složky se struktura vírového copu stává mohutnější. Může zde vznikat dvojité spirální struktura, jak ukazuje obr.2.4 vzniklý vizualizací z SBES simulací pro hodnoty 70v30.

Možnosti zobrazení objemových dat můžeme rozdělit na dvě základní kategorie:

- Algoritmy zobrazující povrch
- Přímé objemové renderování (DVR – *Direct Volume Rendering*)

Přímé objemové renderování

Metody označované v anglické literatuře jako DVR (*direct volume rendering*) nevytvářejí síť trojúhelníků, ale zobrazují skalární pole přímo bez povrchové reprezentace.^[21] Výstupem těchto metod je tedy obraz, který je uživateli zobrazen přímo na zobrazovací rovinu. Nevyužívají pro vykreslení žádné 3D polygony, ale místo toho jsou pixely výsledného obrazu spočítány individuálně, buď pomocí vrhání paprsku do scény nebo pomocí promítnutí voxelů na rovinu projekce.

Často používaným algoritmem spadajícím do přímého objemového renderování je tzv Volume Ray Casting

Volume Ray Casting je technika založená na fyzikální podstatě světla a funguje na principu vrhání paprsku objemovými daty. Paprsek je promítán ve směru pohledu skrz pixel ve zobrazovací rovině a následně je pro něj určeno, zda prošel nějakým objektem či nikoli. Jestliže při průchodu scénou narazil na nějaký objekt, nastaví se barva příslušného pixelu na barvu objektu.^{[22][21]}

3.4.5 Animace

Jak bylo zmíněno, pohyb částic lze efektivně vizualizovat prostřednictvím animací. Ty mohou být buďto spouštěny v reálném čase anebo sekvenčně v jednotlivých intervalech. Podstatnou nevýhodu představuje čas. Rychlost procesu můžeme ovlivnit primárně zvolenými technikami vykreslování.^[12]

4 Prvky a veličiny k vizualizaci proudění

Následující kapitoly popisují prvky a veličiny, které byly zavedeny specificky pro analýzu proudění.

4.1 Proudnice a proudoplochy

Pojem “proudnice”, resp. “proudová čára” (angl. *streamline*), úzce souvisí s Eulerovou metodou popisu kontinua.

Je definována jako myšlená čára, ke které je vektor rychlosti tekutiny \vec{v} v daném časovém okamžiku tečný. Platí^[8]

$$\vec{v} \times d\vec{l} = \vec{0} \quad (4.1)$$

kde rychlost \vec{v} lze rozepsat do jednotlivých složek $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ a element proudnice $d\vec{l} = (dx, dy, dz)$, kde dx, dy, dz jsou diferenciály jednotlivých prostorových souřadnic.

$$v_x dz - v_z dy = 0 \implies \frac{v_y}{dy} = \frac{v_z}{dz} \quad (4.2)$$

$$v_z dx - v_x dz = 0 \implies \frac{v_x}{dx} = \frac{v_z}{dz} \quad (4.3)$$

$$v_x dy - v_y dx = 0 \implies \frac{v_y}{dy} = \frac{v_x}{dx} \quad (4.4)$$

Dostáváme tak, že

$$\frac{v_x}{dx} = \frac{v_y}{dy} = \frac{v_z}{dz} . \quad (4.5)$$

Proudnice se získají vyřešením této rovnice. Položme

$$\frac{v_x}{dx} = \frac{v_y}{dy} = \frac{v_z}{dz} = \frac{1}{dh} , \quad (4.6)$$

kde dh je integrační krok. Pak lze psát:

$$\frac{dx}{dh} = v_x , \quad \frac{dy}{dh} = v_y , \quad \frac{dz}{dh} = v_z \quad (4.7)$$

Derivace na levé straně se diskretizují pomocí vhodné numerické metody.

Označme vektorem $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ počáteční pozici. Zvolíme-li Eulerovu metodu, pak

$$\frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta h} = v_x(\vec{r}_i) \quad , \quad \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta h} = v_y(\vec{r}_i) \quad , \quad \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta h} = v_z(\vec{r}_i) \quad (4.8)$$

Δh je zvolený krok.

Tím máme tři rovnice o třech neznámých, které určují následující bod na proudnici

$$\vec{r}_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}) \quad (4.9)$$

V praxi se používají přesnější metody. V programu ParaView (viz kapitola 5.1), ve kterém byla data pro tuto práci zpracována, se využívají Runge-Kuttovy metody 2. řádu, 4. řádu a 4. - 5. řádu.

4.2 Trajektorie částic

Zatímco proudnice představují obraz proudění v daném časovém okamžiku, trajektorie charakterizují pohyb částice v časovém intervalu. Trajektorie (angl. *pathline*) lze definovat jako čáry, po kterých se pohybují zvolené částice.

Pojem trajektorie je spojen s Lagrangeovou metodou popisu kontinua. V případě stacionárního proudění jsou trajektorie shodné s proudnicemi. U nestacionárního proudění jsou totožné jen tehdy, mění-li se pouze velikost rychlosti, ne však její směr.

Matematický popis vychází z definice rychlosti, která je derivací polohy částice podle času.

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \quad (4.10)$$

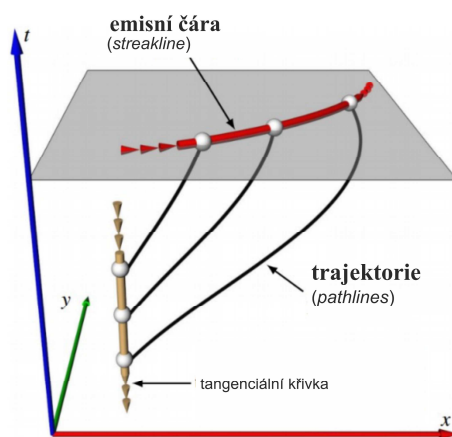
Po rozepsání do jednotlivých složek:

$$\frac{dx}{dt} = v_x \quad , \quad \frac{dy}{dt} = v_y \quad , \quad \frac{dz}{dt} = v_z \quad (4.11)$$

Pomocí vhodné numerické metody derivace diskretizujeme a řešíme.

4.3 Emisní čára

Emisní čára (angl. *streakline*), která může být také označena jako „sled“^[3], je stejně jako trajektorie ovlivněna časovým průběhem. Lze ji získat tak, že s určitým časovým krokem umístíme do daného bodu pasivní částice a počítáme jejich trajektorie. Emisní čára je pak spojnicí poloh všech částic v daném časovém okamžiku.



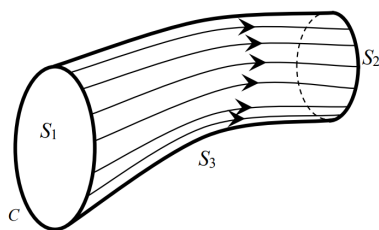
Obr. 4.1: Znáznornění způsobu tvorby trajektorie a emisní čáry, částice se vstříkují z jednoho místa ale v rozdílném čase,[19]

4.4 Vírové čáry a vírové trubice

Analogicky k proudnicím lze definovat vírovou čáru (angl. *vortex line*). Proudnice byla výše definována jako čára, pro kterou platí, že vektor rychlosti je k ní tečný v každém jejím bodě a udává rozložení rychlostního pole v daném časovém okamžiku. Obdobně, vírová čára je definována jako křivka tečná k vektoru vířivosti v daném bodě, která dává představu o rozložení vířivosti. Matematicky ji lze popsat níže uvedenou rovnicí.^[8]

$$\frac{dx}{\omega_x} = \frac{dy}{\omega_y} = \frac{dz}{\omega_z} \quad (4.12)$$

Vírové čáry procházející uzavřenou křivkou tvoří tzv. vírovou trubici (angl. *vortex tube*), jejíž tekutý obsah pak tvoří vírové vlákno.



Obr. 4.2: Vírová trubice [3]

Tok vektoru vířivosti ω daným průřezem vírové trubice nazýváme „intenzitou vírové trubice,“ nebo také „intenzitou víru“ μ .^[7]

$$\mu = \int_{S_n} \omega_n dS_n \quad (4.13)$$

kde ω_n – složka vektorů víru, která je kolmá na řez S_n

5 Softwary pro vizualizaci dat

Vědecké vizualizace vytváří velké objemy dat, díky nimž může být mnohdy vizualizace obtížná. Proto je schopnost zpracovávat takto velké údaje kritickým požadavkem kladeným na vizualizační programy.

Existuje celá řada vizualizačních balíčků sloužících pro vědeckou vizualizaci. Příkladem může být AVS2, OpenDX, SCIRun, ParaView, nebo EnSight od společnosti ANSYS. Volba programu pro post-processing je dána konkrétní aplikací, schopností uživatele a je také otázkou kompromisu. Výhodou použití programu SCIRun může být schopnost vizualizovat data z běžící simulace. Za univerzální by se dali označit balíčky s otevřeným zdrojovým kódem, kam patří například OpenDX, SCIRun nebo ParaView. To však vyžaduje určitou znalost skriptovacího jazyka třídy C++, Python nebo jiných. Proto jsou zde programy nabízející grafické uživatelské rozhraní (GUI). Mezi ně patří EnSight a ParaView, které tak umožňují vytvářet vizualizace bez znalosti programování.^[16]

5.1 ParaView

Jak bylo poznamenáno, ParaView je vizualizační nástroj založený na VTK, který běží na různých platformách. Skládá se ze sady spustitelných souborů pro generování datových vizualizací pomocí technik dostupných ve VTK.

Je možné jej řídit uživatelskými skripty v jazyce Python nebo existuje verze nabízející grafické uživatelské rozhraní. To je tvořeno 5 částmi: *Menu*, *Toolbars*, *Pipeline Browser*, *Object Inspector* a *View Area*. ParaView umožňuje zobrazit data na rovnoměrných, křivočarých strukturovaných sítích a na polygonálních (2D) a obecných (3D) nestrukturovaných sítích. K nahraným datům se připojují filtry uspořádávající se do stromové struktury, která definuje pořadí zpracování. Zde se zároveň vyznačí, co přesně má být na výstupu viditelné. Poskytovaných filtrů pro transformaci dat a provedení analýzy je v ParaView mnoho.^{[15][16]}

6 Metody pro identifikaci jader vírů

Skutečná exaktní matematicko-fyzikální odpověď, na otázku vlastní definice víru, respektive identifikace víru, je v odborné literatuře stále předmětem diskuze. Je nesporné, že identifikační metody a kritériální veličiny sloužící ke stanovení vírových struktur v proudění, jsou velmi potřebné a také užitečné.

Identifikační metody jsou zpravidla založeny na údajích o rychlosti, především na údajích o změně rychlosti v prostoru a čase. Metody mohou být také založeny na údajích o tlaku a jeho změnách

Na základě výsledků identifikace vírových struktur pak můžeme vlastnosti proudění dále studovat a následně se pokusit objasnit další jevy vírového charakteru.

Jedním z problémů identifikace vírových struktur je selhání standardních charakteristik. Pro lepší objasnění významu lze uvést následující skutečnosti:

Prvním příkladem mohou být uzavřené nebo spirální proudnice (popř. trajektorie částic), které ale nejsou galileovskými invariantní. Galileovská invariantní znamená invariantní vůči rovnoměrné přímočaré translaci pozorovatele.

Dále pak vířivost, galileovská invariantní průměrná úhlová rychlost elementu tekutiny, není schopna rozeznat rozdíl mezi smykovým a skutečně rotačním pohybem ve víru. Nalezení lokálního minima, kde se využívá faktu, že v jádru víru je nejnižší tlak, ovšem obecně negarantuje existenci víru.

Tyto skutečnosti byly motivací pro vznik několika poněkud sofistikovanějších metod.

Na identifikační metody klademe celou řadu obecných požadavků, které zatím žádná metoda nesplňuje jako celek. Mezi široce používané metody patří například: Q kritérium, λ_2 kritérium, Δ kritérium. Některé vybrané budou popsány v následujících podkapitolách. [29][30]

Zdroj [29] uvádí některé obecné požadavky kladené na identifikační metody. Jsou jimi:

- *platnost pro stlačitelné proudění a proudění s proměnlivou hustotou*
- *stanovení lokální intenzity rotačního pohybu*
- *stanovení orientace otáčení*
- *stanovení integrální síly víru*
- *identifikace osy víru*
- *specifické požadavky na osu víru: existence a jednoznačnost pro každou spojitou oblast víru*
- *stanovení hranice víru (fyzikální kritérium vs. práh kritériální veličiny)*
- *neomezené axiální napínání víru vs. orbitální kompaktnost*
- *popis nelokálních vlastností víru korelačního charakteru*
- *nezávislost výsledků na translaci a rotaci referenčního systému*

Zdroj [29] zároveň kriticky hodnotí některé z požadavků jako diskutabilní, a to pro jejich rozporuplnost. Někteří badatelé například připouští neomezené axiální napínání víru, zatímco jiní trvají na určité vnitřní orbitální kompaktnosti.

6.1 Q kritérium

Q kritérium definuje vírovou strukturu jako oblast, ve které velikost vířivosti převažuje nad velikostí rychlosti deformace. Je definováno jako druhý invariant tenzoru rychlosti deformace. Platí:^{[30][24]}

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (6.1)$$

Tenzor vířivosti Ω je antisymetrická část tenzoru gradientu rychlosti $\nabla \vec{v} = J$. Lze jej zapsat jako:

$$\Omega = \frac{J - J^T}{2} \quad (6.2)$$

Tenzor rychlosti deformace značíme S a je to symetrická část tenzoru gradientu rychlosti $\nabla \vec{v}$

$$S = \frac{J + J^T}{2} \quad (6.3)$$

Definujeme-li tenzor gradientu rychlosti,

$$J = \nabla \vec{v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

pak můžeme vztah (4.1) rozepsat na tvar:

$$Q = -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] - \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \cdot \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \cdot \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \cdot \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \quad (6.5)$$

V jádrech víru platí $Q > 0$

6.2 λ_2 kritérium

Princip λ_2 kritéria spočívá v rozdělení tenzoru J na symetrickou část S a antisymetrickou část Ω , jak je uvedeno v kapitole 6.1. Dalším krokem je výpočet vlastních hodnot matice A , dané vztahem:^[24]

$$A = S^2 + \Omega^2 \quad (6.6)$$

Výsledkem jsou tři vlastní hodnoty λ , které splňují následující podmínku: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$. V jádrech víru platí $\lambda_2 < 0$.

6.3 Normalizovaná helicity

Způsob identifikace vírové struktury pomocí proudnic je v počítačové mechanice tekutin dobře použitelný v případě, kdy není problémem získat průměty proudnic do roviny kolmé k vírovému jádru, které v případě vírové struktury mají kruhový nebo spirálový charakter.

V jádře víru je úhel mezi vektorem vířivosti a vektorem rychlosti minimální. Lze jej identifikovat pomocí tzv. normalizované helicity. Vyjádříme-li vektor vířivosti pomocí vztahu (1.1), pak lze normalizovanou helicitu definovat jako:

$$H_n = \frac{v \cdot \text{rot}v}{|v| \cdot |\text{rot}v|} \quad (6.7)$$

V podstatě se jedná o kosinus úhlu, který mezi sebou zmíněné vektory svírají.^{[15] [23]} Příklad použití helicity je na obr. 2.3.

7 Transport pasivního skaláru

Transport pasivního skaláru slouží v grafické vizualizaci k imitaci vstřikování barviva. Vizualizace pomocí barviva patří k nejstarším vizualizačním technikám proudění. Pomocí této metody byly objeveny některé významné jevy v mechanice tekutin. Příkladem je Reynoldsův pokus, který byl popsán v kapitole 2.

Základním předpokladem transportu pasivního skaláru je, že neovlivní důležité vlastnosti z hlediska dynamiky tekutin (je pasivní) a nepředpokládají se u něj žádné fyzické rozměry. Pasivním skalárem může být koncentrace určité příměsi nebo teplota.

Výpočetní doména je řešena pro tři pole: tlak, rychlost, pasivní skalár. Je důležité, aby výchozí okrajové podmínky byly specifikovány pro všechny proměnné na každé hranici.^[3]

7.1 Lagrangeova metoda

Nejprve zvolíme plochu, kterou má být barvivo vstřikováno. Na této ploše pro každý časový krok inicializujeme nové částice a dále počítáme jejich trajektorie. Následně pak pro každou buňku spočítáme koncentraci barviva na základě počtu částic, které se v ní nachází.

Výhodou použití Lagrangeovy metody je nepřítomnost numerické difuze, avšak na úkor výpočetní náročnosti, skrze potřebu obrovského množství částic. Samotný výpočet koncentrace barviva je tudíž velmi časově náročný.

7.2 Eulerova metoda

V případě Eulerovy metody namísto sledování částic řešíme diferenciální rovnici pro koncentraci barviva φ (konvektivně-difuzní rovnice)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad} \varphi) - \vec{v} \text{grad} \varphi \quad (7.1)$$

Protože platí $\text{div}(\varphi \vec{v}) = \vec{v} \text{grad} \varphi + \varphi \text{div} \vec{v}$, můžeme pro nestlačitelnou kapalinu, s platností rovnice kontinuity, kde $\text{div} \vec{v} = 0$, psát:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad} \varphi) - \text{div}(\varphi \vec{v}) \quad (7.2)$$

kde $\text{div}(D \text{grad} \varphi)$ je difuzní člen a $\text{div}(\varphi \vec{v})$ konvektivní člen, přičemž \vec{v} je rychlost kapaliny.

Difuzní člen modeluje difuzi (rozpuštění barviva v kapalině). Míru difuze vyjadřuje difuzní součinitel.

Konvektivní člen modeluje unášení barviva proudící kapalinou.

Ve srovnání s Lagrangeovou metodou je Eulerova pro „větší“ množství barviva méně výpočetně náročná. Nastává zde však problém s nefyzikální numerickou difuzí.^{[3][27]}

7.3 Vizualizace metodou transportu pasivního skaláru

Pro vizualizace metodou transportu pasivního skaláru byly uvažovány tři přístupy pro volbu okrajových podmínek:

- vstřikování barviva těsně pod náboj
- vstřikování barviva ze spodní části k vizualizaci zpětného proudění
- vstřikování barviva před vstup do savky

Vstřikování barviva ze spodní části k vizualizaci zpětného proudění se ukázalo jako bezvýsledné, jelikož se barvivo vlivem nestacionarity dostalo po jisté době do oblasti, kde proudilo zpět a výsledný obraz se stal nepřehledným.

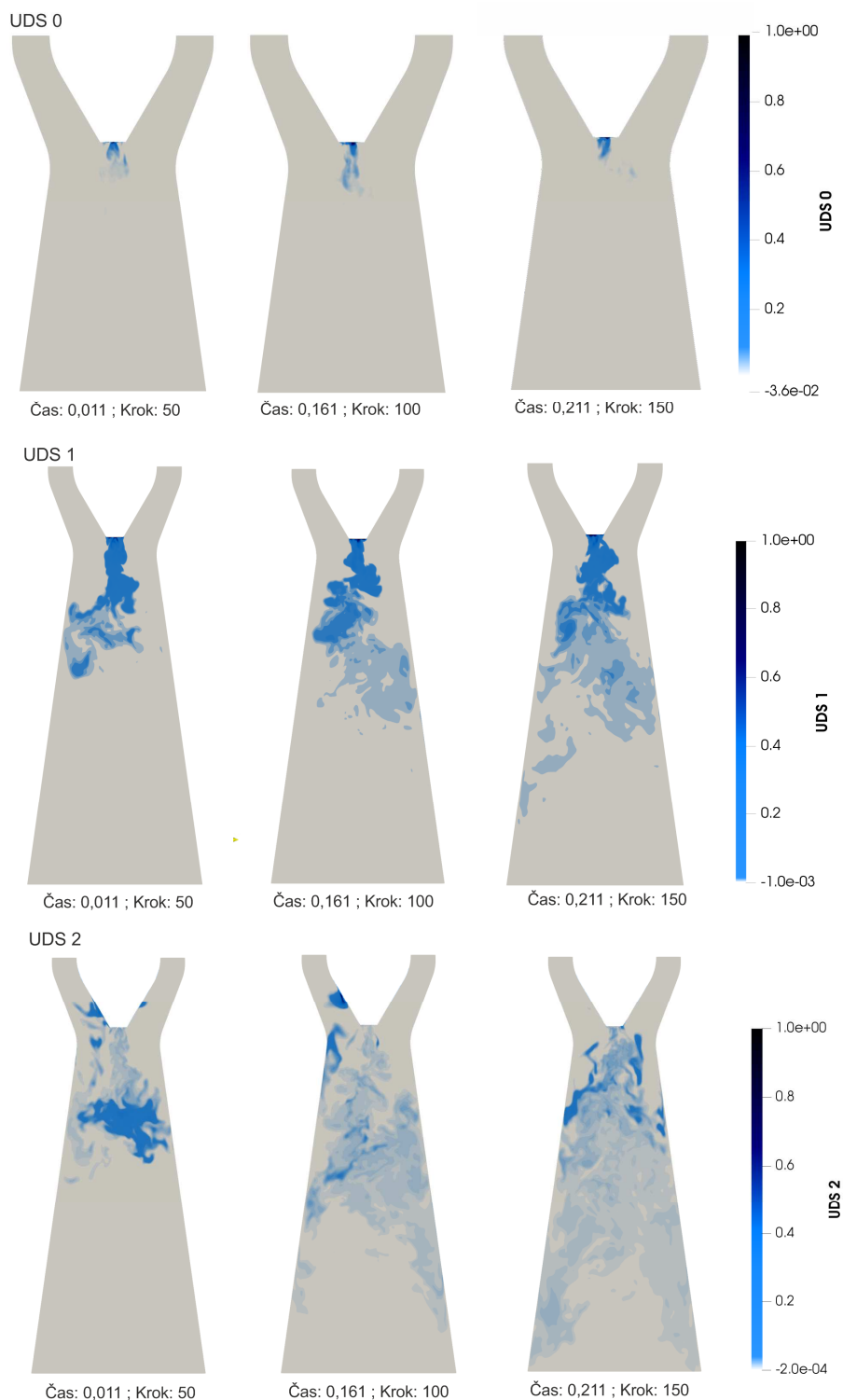
Simulace byly provedeny v programu Fluent, kde se řešila konvektivně-difuzní rovnice s uvažováním nulové difuze.

Okrajové podmínky pro pasivní skalár:

UDS 0	$r = 0 \div 2,5 \text{ mm}$	$\varphi = 1$
	$z = 124 \text{ mm}$	
UDS 1	$r = 2,5 \div 5 \text{ mm}$	$\varphi = 1$
	$z = 124 \text{ mm}$	
UDS 2	$z = 83 \text{ mm}$	$\varphi = 1$ pokud $p' = 1200 \text{ Pa}$, kde $p' = p - \bar{p}$

p – hodnota tlaku v daném místě

p' – střední průřezová hodnota tlaku



Obr.7.1: Vizualizace pasivního skaláru v řezu pro jednotlivé okrajové podmínky.

Závěr

Cílem práce bylo podat přehled z oblasti vizualizace proudění a popisované techniky aplikovat na data popisující proudění ve vírovém generátoru.

Úvodní část práce obsahuje kromě přehledu vizualizačních metod v oblasti dynamiky tekutin také krátký úvod do problematiky turbulentního proudění, jehož znalost je nezbytná pro analyzování výsledných vizualizací v této práci. Proudění ve výstupním difuzoru vírového generátoru je náchylné na vznik nestacionárního proudění. Dochází ke tvorbě spirální struktury rotující kolem osy difuzoru, která je označována jako vírový cop.

V kapitole 3.4 byly poznatky z úvodní části použity k provedení vizualizací. Kapitola zároveň uvádí přehled silných a slabých stránek různých přístupů pro řešení daného problému.

V oblasti proudění je využívanou metodou vizualizace proudnic. Vhodnou volbou okrajových podmínek se podařilo zachytit spirálovitou strukturu tohoto jevu, jak lze pozorovat na obr. 3.4 (b). V porovnání s obr. 3.6, kde trubice vlivem zvolení většího poloměru nekopírují konturu vírového copu natolik dobře. Samotný tvar copu je vhodné zobrazovat konturami nebo pomocí objemu. Se zvyšující se hodnotou tangenciální složky průtoku je spojeno nabývání na jeho mohutnosti. Zajímavou vlastností je pak také tvorba dvojité spirály, která je zachycena na obr. 2.4.

Vykreslením textury lze pozorovat rozložení velikosti rychlosti nebo tlaku. Na obr. 3.11 jsou viditelné hodnoty nízkého tlaku pod nábojem, kde vírový cop vzniká.

Dobrou představu o charakteru proudění v difuzoru podává technika objemového renderování. S ohledem na výpočetní náročnost byly vizualizace transportu pasivního skaláru provedeny v předem definovaném řezu. Víry přicházející ze spirály nejsou jasně patrné a lze je pozorovat pouze v podobě skvrn okolo náboje. Důsledkem je snížená vypovídající hodnota těchto vizualizací v případě výsledů UDS 2.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 9788021435780.
- [2] HRIVŇÁK, Daniel. *Diferenciální operátory vektorové analýzy* [online]. Ostrava: Ostravská univerzita, 2002, , 39 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/uvma3/UVMA3_1.pdf
- [3] URUBA, Václav. *Turbulence*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-0105-600-4.
- [4] URUBA, Václav. *Pořádek, nepořádek, chaos a turbulence* [online]. 2006, , 12 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/lit/Turbulence.pdf>
- [5] VIITANEN, Ville, Antti HYNINEN, Tuomas SIPILÄ a Timo SIIKONEN. DDES of Wetted and Cavitating Marine Propeller for CHA Underwater Noise Assessment. *Journal of Marine Science and Engineering* [online]. 2018, 6(2) [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.3390/jmse6020056. ISSN 2077-1312. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2077-1312/6/2/56>
- [6] *Základní rovnice pro metodu CFD* [online]. In: 2017, s. 13 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/zakladni.rovnice.CFD.pdf>
- [7] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2000. ISBN 80-200-0772-5.
- [8] KOZÁK, J. Vírový cop při nadoptimálním průtoku Francisovou turbínou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 125 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
- [9] LUGT, H. J. *Vortex flow in nature and technology*. John Wiley & Sons, 1983. 297 s. ISBN 0-471-86925-2.
- [10] RUDOLF, P. A contribution to study of the swirling flow. Brno, 2010. 114 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [11] HENRYK, Kudela. *Turbulent flow* [online]. 2010 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam_FM/Lecture_no3_Turbulent_flow_Modelling.pdf
- [12] HAGEN, Hans, Heinrich MÜLLER a Gregory M. NIELSON, ed. *Focus on scientific visualization*. Berlin: Springer-Verlag, c1993. Computer graphics. ISBN 3-540-54940-4.
- [13] NIELSON, Gregory M., Bruce D. SHRIVER a Lawrence J. ROSENBLUM. *Visualization in scientific computing*. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society Press, c1990. ISBN 081868979x.
- [14] WEISKOPF, Daniel a Gordon ERLEBACHER. Flow Visualization Overview. *In Handbook of Visualization* [online]. 2005, 22 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://people.sc.fsu.edu/~gerlebacher/home/publications/overview_flow_weiskopf_erlebach_2004.pdf
- [15] HANSEN, Charles D. a Chris R. JOHNSON. *The visualization handbook*. Boston: Elsevier-Butterworth Heinemann, c2005. ISBN 012387582X.

- [16] QUAMMEN, Cory. *Scientific Data Analysis and Visualization with Python, VTK, and ParaView*[online]. 2015, 8 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://conference.scipy.org/proceedings/scipy2015/pdfs/cory_quammen.pdf
- [17] SCHROEDER, Will, Ken MARTIN a Bill LORENSEN. *The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach To 3D Graphics*[online]. 2006, , 528 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/William_Schroeder3/publication/200034772_The_Visualization_Toolkit_An_Object-Oriented_Approach_To_3D_Graphics/links/57dfcfa708ae1dcfea865e57/The-Visualization-Toolkit-An-Object-Oriented-Approach-To-3D-Graphics.pdf
- [18] POST, Frits H., Benjamin VROLIJK, Helwig HAUSER, Robert S. LARAMEE a Helmut DOLEISCH. The State of the Art in Flow Visualisation: Feature Extraction and Tracking. *Computer Graphics Forum* [online]. 2003, **22**(4), 775-792 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2003.00723.x. ISSN 01677055. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-8659.2003.00723.x>
- [19] ŠMOLÍK, Michal. *Visualization methods for large n-dimensional and t-variant data: State of the Art and Concept of Ph.D. Thesis* [online]. University of West Bohemia, 2016, 90 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://meshfree.zcu.cz/data/doc/State%20of%20the%20Art%20and%20Concept%20of%20PhD%20Thesis.pdf>
- [20] HEROUT, Adam a Pavel TIŠNOVSKÝ. Vizualizace vektorových polí s využitím metody sledování částic. *Vizualizace vektorových polí s využitím metody sledování částic* [online]. 2002, **2002**(4), 6 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02020/kap4.htm>
- [21] LACROUTE, Philippe G. *Fast volume rendering using a shear-warp factorization of the viewing transformation* [online]. Stanford University: Computer Systems Laboratory, 1995, 236 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://users.csc.calpoly.edu/~zwood/teaching/csc572/final11/ghflores/documents/FastVolumeRendering.pdf>
- [22] MARTIŠEK, Dalibor a Karel MARTIŠEK. Direct Volume Rendering Methods for Cell Structures. *Scanning* [online]. 2012, **34**(6), 367-377 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1002/sca.21019. ISSN 01610457. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/sca.21019>
- [23] SCHEELER, M. W., D. KLECKNER, D. PROMENT, G. L. KINDLMANN a W. T. M. IRVINE. Helicity conservation by flow across scales in reconnecting vortex links and knots. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2014, **111**(43), 15350-15355 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1073/pnas.1407232111. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1407232111>
- [24] JIANG, Ming, Raghu MACHIRAJU a David THOMPSON. *Detection and Visualization of Vortices*[online]. The Ohio State University, Mississippi State University, 2005 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.cavs.msstate.edu/publications/docs/2005/01/3269visHandbook.pdf>
- [25] LARAMEE, R.S., D. WEISKOPF, J. SCHNEIDER a H. HAUSER. Investigating swirl and tumble flow with a comparison of visualization techniques. In: *IEEE Visualization*

- 2004 [online]. IEEE Comput. Soc, 2004, s. 51-58 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1109/VISUAL.2004.59. ISBN 0-7803-8788-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1372179/>
- [26] RÖBER, Niklas. *Paraview Tutorial for Climate Science* [online]. 2014, **2014**, 61 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.dkrz.de/mms/pdf/vis/paraview.pdf>
- [27] TRÁVNÍČEK, Zdeněk. *Příklady použití kouřové vizualizace proudění v experimentální mechanice tekutin*. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, 2002, (VVI), 6.
- [28] SKRIPKIN, S., M. TSOY, P. KUIBIN, S. SHTORK, D. MARKOVICH, D. ZAITSEV a A. SEMENOV. *Vortex rope instabilities in a model of conical draft tube*. EPJ Web of Conferences. 2017, 159. DOI: 10.1051/epjconf/201715900048.
- [29] Víry kolem nás. *Ústav pro Hydrodynamiku, Akademie věd České republiky*, v. v. i. [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.ih.cas.cz/viry-kolem-nas/>
- [30] KOLÁŘ, V. a J. ŠÍSTEK. *Corotational and Compressibility Aspects Leading to a Modification of the Vortex-Identification Q-Criterion*. AIAA Journal [online]. 2015, **53**(8), 2406-2410 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.2514/1.J053697. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.J053697>

Zdroje obrázků

U převzatých obrázků je zdroj uveden v popisku. V ostatních případech jsou obrázky původní.

Seznam symbolů a jednotek

Označení	Popis	Jednotka
A	obecná matice	
a	zrychlení	$[\text{m/s}^2]$
D	charakteristický rozměr	$[\text{m}]$
$f(r)$	skalární pole	
$F(r)$	vektorové pole	
H_n	normalizovaná helicity	$[\text{m/s}^2]$
$I(x)$	výstupní intenzita pixelu x	$[\text{m}^2/\text{s}]$
J	tenzor gradientu rychlosti	
J^T	tenzor gradientu rychlosti transponovaný	
$k(s)$	kernel filtru	
$K(x)$	intenzita šumu na pozici x	$[\text{mol/m}^2\text{s}]$
L	parametr určující délku proudnice	
p	tlak	$[\text{Pa}]$
Q	kriteriální veličina Q kritéria	
$r(s)$	je předpis křivky, která má tvar proudění	
Re	Reynoldsovo číslo	$[1]$
s	parametr křivky	
S	tenzor rychlosti deformace	
S_n	plocha	$[\text{m}^2]$
T	teplota	$[\text{°C}]$
t	čas	$[\text{s}]$
t_0	počáteční čas	
v	rychlost	$[\text{m/s}]$
x	pixel	
λ	kriteriální veličina λ_2 kritéria	
μ	intenzita víru	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ν	kinematická viskozita	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ρ	hustota	$[\text{kg/m}^3]$
φ	koncentrace barviva	$[\text{mol/m}^3]$
Ω	tenzor vířivosti	
ω	vířivost	$[\text{rad/s}]$
ω_n	složka vektoru vířivosti	$[\text{rad/s}]$

Seznam použitých zkratek

2D	dvoudimenzionální
3D	třídimenzionální
CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora obrábění)
CFD	Computational Fluid Dynamics (výpočtové modelování proudění)
DVR	Direct Volume Rendering (přímé objemové renderování)
GPU	Graphical Processing Unit (grafická procesorová jednotka)
GUI	Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)
LEA	Lagrangian-Eulerian advection (Lagrangeova-Eulerova advekce)
LIC	Line Integral Convolution (lineární integrální konvoluce)
RC	Ray Casting
VTK	Visualization Toolkit (vizualizační sada nástrojů)

Název souboru: BP_Finalni verze_opraveno
Adresář: C:\Users\Eva\Documents
Šablona: C:\Users\Eva\AppData\Roaming\Microsoft\Templates\Normal.
dotm
Název: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Předmět:
Autor: -
Klíčová slova:
Komentáře:
Datum vytvoření: 22.5.2019 21:40:00
Číslo revize: 3
Poslední uložení: 23.5.2019 11:29:00
Uložil(a): Častulíková Veronika (183006)
Celková doba úprav: 142 min.
Poslední tisk: 23.5.2019 12:01:00
Jako poslední úplný tisk
Počet stránek: 47
Počet slov: 8 947 (přibližně)
Počet znaků: 52 793 (přibližně)